

# Atomare Zwischen- und Endlagerung – eine Lösungsperspektive mit Beton?

Harald S. Müller und Nico Herrmann

## Zusammenfassung

Im Zuge der Erstellung eines sicheren und zukunftsfähigen Zwischen- und Endlagerkonzeptes für radioaktive Abfälle wurde die seit Jahrzehnten allein favorisierte Lösung einer Endlagerung durch Verbringung in Salzstöcke im Laufe der jüngeren Vergangenheit in Frage gestellt. Die Suche nach dem optimalen Endlager wurde auch für die Verbringung in tonhaltige und kristalline Gesteine sowie für andere Lösungsansätze wieder offen gehalten. Eine zentrale Forderung der aktuellen Konzepte ist die Rückholbarkeit der nuklearen Abfälle aus dem Endlager, um es späteren Generationen zu ermöglichen, ggf. mit Hilfe neuer Technologien ein verbessertes Vorgehen in Angriff nehmen zu können.

In der Frage der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle ergibt sich eine zusätzliche Motivation für neue Herangehensweisen. Grund hierfür ist die Tatsache, dass teilweise bereits in den 2030er-Jahren Betriebsgenehmigungen für bestehende Zwischenlager auslaufen und damit die Errichtung neuer Zwischenlager an den zu diesem Zeitpunkt noch nicht nutzbaren Endlagerstandorten mit großer Wahrscheinlichkeit erforderlich sein wird. Diese neuen Zwischenlager werden oberirdisch oder zumindest oberflächennah angeordnet sein und müssen alle Anforderungen des Umgebungsschutzes insbesondere auch gegen terroristische Anschläge und Naturkatastrophen erfüllen.

Die genannten Randbedingungen werfen neue von der Wissenschaft zu beantwortende Fragen auf. Diese umfassen das Baukonzept selbst, die Wechselwirkung zwischen den geologischen Bedingungen und den einzusetzenden Materialien sowie natürlich die mechanische Widerstandsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Bauwerke. Gerade die nunmehr neu zu berücksichtigenden Gesteinsformationen bedingen die Verwendung modernster Betone sowie neuer Bewehrungsmaterialien und -konzepte.

Im vorliegenden Beitrag sollen neue Wege zur Lösung der essentiellen und generationenübergreifenden Aufgabe mit Hilfe von Beton aufgezeigt werden. Es geht vor allem darum, Denkanstöße zu geben und Lösungsperspektiven, die naturgemäß noch keine fertigen und baureifen Konzepte sein können, der Fachwelt zur Diskussion vorzulegen.

## 1 Allgemeines

Bei der Suche nach einem sicheren und zukunftsfähigen Zwischen- und Endlagerkonzept für radioaktive Abfälle wurde die seit Jahrzehnten favorisierte Lösung einer Endlagerung durch Verbringung in Salzstöcke im Laufe der jüngeren Vergangenheit insofern in Frage gestellt, als dass die Suche nach dem optimalen Endlager auch wieder für andere Lösungsansätze offen gehalten wurde. Dies ist verankert im Abschlussbericht der Kommission für die Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe „Verantwortung für die Zukunft – ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes“ (Juli 2016) [1].

Hierbei wird auch weiterhin den geologischen Fragestellungen höchste Priorität eingeräumt, jedoch bietet sich auch die Möglichkeit, über erweiterte oder ganz andere Lösungsperspektiven, z. B. mit Hilfe moderner Betone und Bausysteme, nachzudenken.

Da durch die genannten Randbedingungen die Endlagersuche sowie die Ausgestaltung der Lagerstätten wieder vollkommen offen sind, wird dies sehr wahrscheinlich auch Auswirkungen auf die Bewertung und Auslegung der Zwischenlager haben.

## 2 Zwischenlager

### 2.1 Ausgangssituation

Durch die Entscheidung der Bundesregierung, den Ausstieg aus der Kernenergie bis Ende 2022 zu vollziehen, ergibt sich der Zeitdruck, die Frage der Lagerung von schwach und hoch radioaktiven Abfällen sehr schnell zu lösen. Da durch die neuen Optionen bei der Endlagerfindung eine Lösung bis zum Auslaufen der ersten Betriebsgenehmigungen für bestehende Zwischenlager in den 2030er-Jahren eher unwahrscheinlich scheint, müssen entweder diese Genehmigungen verlängert oder neue Zwischenlager errichtet werden.

Das Baukonzept für neue Zwischenlager muss naturgemäß höchsten Anforderungen an die Integrität der Struktur genügen. Hierzu müssen zeitgemäße Lastannahmen hinsichtlich außergewöhnlicher Lasten (z. B. im Hinblick auf Anprall, Explosion, Erdbeben, ...) berücksichtigt werden.

## 2.2 Lösungsansätze für mögliche neue Zwischenlager

Die oben aufgezeigten Anforderungen an Zwischenlager ließen sich bei Neubauten mit oberirdischen und oberflächennahen Bauweisen realisieren. Die technologischen Grundansätze sind bekannt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Nutzung von Fertigteilen  
→ leichte Erweiterung bzw. Rückbaubarkeit der Strukturen
- Einsatz von ultrahochfestem Beton (UHPC)  
→ höheres Sicherheitsniveau
- Verwendung innovative Bewehrungs- und Verbindungstechnik  
→ hohe Dauerhaftigkeit

Die Nutzung der Fertigteilbauweise bringt einige erhebliche Vorteile mit sich:

- Die Vorfertigung verkürzt die Bauzeit erheblich und vermeidet lange Standzeiten „halbfertiger“ Strukturen
- Anforderungsgerechte Verwendung verschiedener Betone; Gradientenbetone sowie „Zonenbewehrung“ leicht und sicher realisierbar
- Systembaukonzept erleichtert jegliche Art von Erweiterung und Rückbau
- Qualitätssicherung im Werk sehr viel besser gewährleistet als beim Bau mit Ort beton
- Nur Bauteile mit Zertifikat kommen auf die Baustelle  
→ kein Rückbau bei Materialfehlern notwendig

Die folgende Abb. 1 zeigt das Prinzip einer möglichen Ausgestaltung eines Zwischenlagermoduls, dessen Größe im vorliegenden Beispiel auf eine Einzelkapazität von vier CASTOR-Behältern ausgelegt wurde.

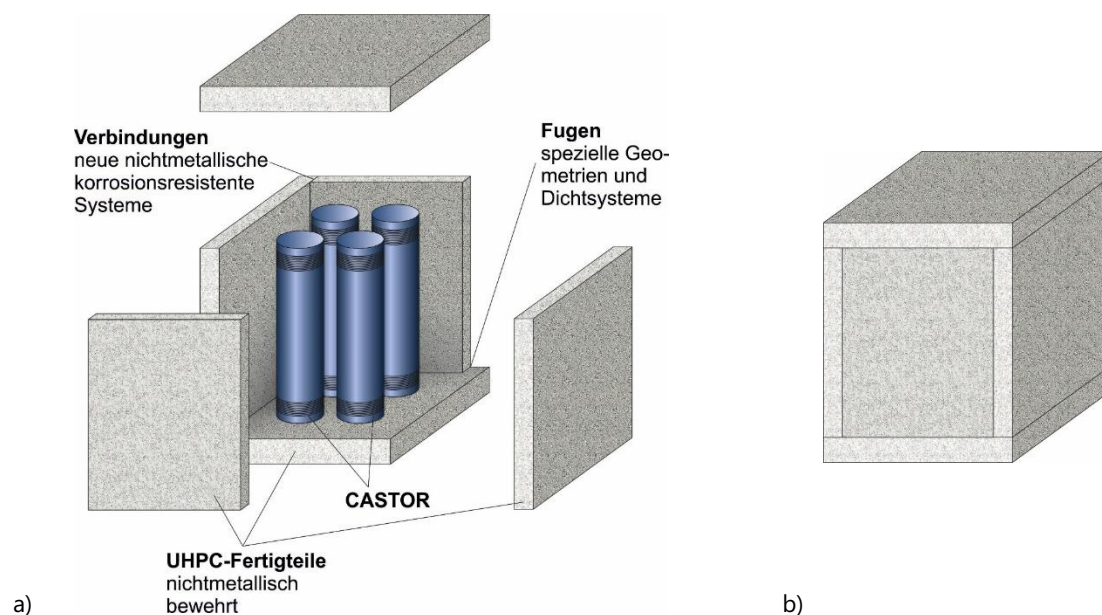


Abb. 1: Prinzipskizze eines Zwischenlagermoduls: a) Elemente des Moduls (Bauzustände) b) geschlossenes Modul (Endzustand)

Auf die genaue Ausarbeitung und Darstellung von Details wie beispielsweise Öffnungen, externe Anschlagpunkte sowie Fugen- und Verbindungselemente wurde an dieser Stelle verzichtet.

Hinsichtlich der Verbindungen sollten nichtmetallische, korrosionsresistente Systeme eingesetzt werden. Hierbei kommt der Anwendung neuer Materialien eine große Bedeutung zu. Man könnte sich hier

sehr gut carbon- oder glasfaserbasierte Systeme vorstellen, die eine exzellente Performance hinsichtlich der Dauerhaftigkeit zeigen.

Bei den Fugen- bzw. Dichtsystemen müssen spezielle Geometrien geplant und der Einsatz innovativer, extrem dauerhafter Materialien vorgesehen werden. Geeignete Systeme lassen sich ausgehend vom Stand der Technik entwickeln.

Die Fertigteile selbst könnten aus einem UHPC bestehen. Durch erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der vergangenen Jahre konnten bei UHPC große Erfolge hinsichtlich deren Verarbeitbarkeit im Fertigteilwerk erzielt werden, so dass Festigkeiten von mehr als 200 MPa zielsicher erreichbar sind und sogar deutlich übertroffen werden können. Diese Betone zeigen zudem ein optimiertes Kriech- und Schwindverhalten, was die Auslegung für Langzeitanwendungen vereinfacht.

Das Dauerhaftigkeitspotenzial gegenüber chemischen Angriffen ist um ein Vielfaches höher als bei Normalbetonen. Ein Karbonatisierungsfortschritt ist kaum messbar, würde aber letztlich auch keine Rolle spielen, da eine nicht-metallische Bewehrung vorgesehen ist. Wissenschaftliche Untersuchungen belegen auch, dass selbst extreme Frostbeanspruchungen die Integrität von UHPC nicht beeinträchtigen.

Diese vorangehend genannten erhöhten Widerstände von UHPC gegenüber verschiedenen Einwirkungen liegen vor allem in der geringen Porosität dieser Betone begründet. Eine Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Poren zeigt, dass diese im UHPC etwa zehnfach feiner sind als in Normalbetonen. Auch das Gesamtporenvolumen des UHPC ist signifikant kleiner als das Porenvolumen von herkömmlichen Betonen.

Hinsichtlich der Bewehrung der einzusetzenden Fertigteile sollte man ebenfalls neue, durchaus aber

bereits erprobte Materialentwicklungen berücksichtigen. So gibt es beispielsweise hervorragende und vielversprechende Werkstoffe auf Carbon- und Glasfaserbasis. Eine Carbonbewehrung neuester Generation geht mit Beton einen sehr guten Verbund ein und besitzt Festigkeiten, die etwa das Sechsfache von Stahl betragen, dabei aber nur ein Viertel an dessen Masse mitbringen.

Die Einzelmodule für das Zwischenlager gemäß Abb. 1 sind kombinierbar und damit ausbaubar zu einem gesamten Zwischenlager. Hierzu wird eine massive Bodenplatte erstellt, auf der die Einzelmodule platziert und verankert werden. Sieht man eine entsprechend geeignete Verankerung der CASTOR-Behälter im Innern der Module vor, so besteht auch die Möglichkeit, die bestückten Einzelmodule als Ganzes mit entsprechenden Kränen zu bewegen und anzuordnen. Eine mögliche Anordnung von mehreren Einzelmodulen und deren Zusammenfassung zu einem Gesamtzwischenlager zeigt die folgende Abb. 2.

Um einen zusätzlichen Schutz gegen Anpralllasten (Flugzeugabsturz) zu gewährleisten, kann das Zwischenlager auch oberflächennah ins Erdreich eingebettet werden. Dies gewährleistet trotz der Überdeckung eine leichte Zugänglichkeit bei späteren Maßnahmen oder nötigen Eingriffen. Das Prinzip der Einbettung ist in der Abb. 3 schematisch dargestellt, die das Zwischenlager unter dem transparent dargestellten Erdhügel zeigt.

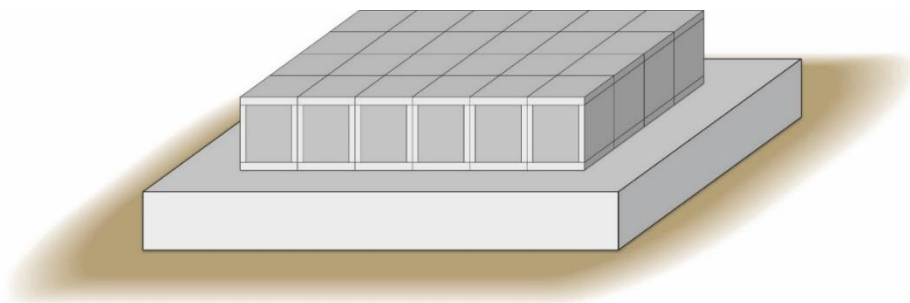


Abb. 2: Aus mehreren Modulen bestehendes Zwischenlager auf einer massiven Bodenplatte

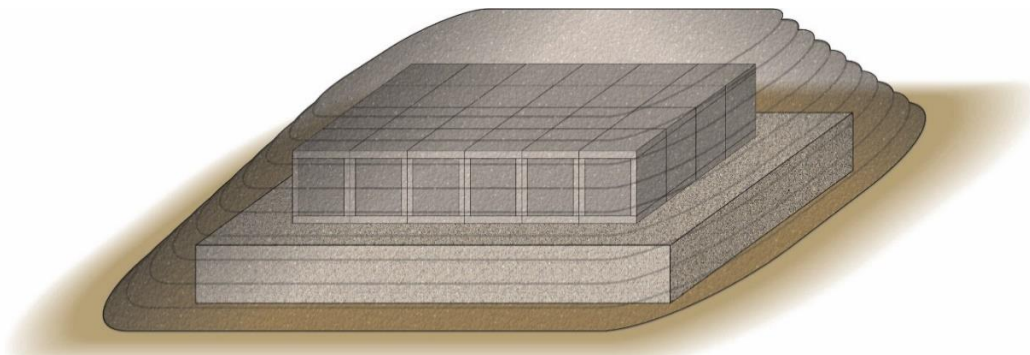


Abb. 3: Oberflächennahe Einbettung des Zwischenlagers ins Erdreich

### 3 Endlager

#### 3.1 Ausgangssituation

Durch die Entscheidung der Bundesregierung, den Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Ende des Jahres 2022 zu vollziehen, ergibt sich Zeitdruck hinsichtlich der langfristigen Lagerung von schwach und hoch aktiven Stoffen. Das neue Endlagersuchkonzept priorisiert auch weiterhin eine Tiefenlagerung, eröffnet aber auch Alternativen. Statt nur Salzstöcke werden auch andere Gesteinsarten in die Überlegungen einbezogen, z. B. tonhaltige und kristalline Gesteine. Eine zentrale Forderung des neuen Konzeptes ist die Sicherstellung der Rückholbarkeit der Abfälle, um es späteren Generationen zu ermöglichen, mit Hilfe

neuer Technologien eine wie auch immer geartete Risikominimierung herbeizuführen. Diese Randbedingung stellt bei einem unterirdischen Endlager ebenso wie die Dauerhaftigkeit und Korrosionsbeständigkeit eine große Herausforderung dar.

#### 3.2 Varianten für mögliche Endlager

Aus der oben beschriebenen Ausgangssituation ergeben sich zwei neue mögliche Varianten für das Konzept eines Endlagers. Diese beiden neuen Varianten bestehen einerseits in einer Tiefenlagerung in den nun auch in Erwägung gezogenen tonhaltigen und kristallinen Gesteinen und andererseits in der Möglichkeit eines Verzichts auf die Tiefenlagerung (siehe Abb. 4), was komplett neue Denkansätze erfordert.

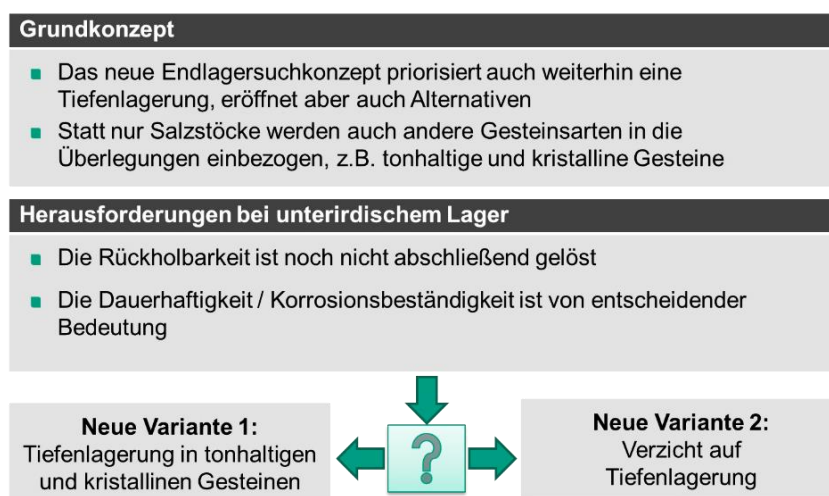


Abb. 4: Mögliche Endlagervarianten entsprechend dem neuen Konzept der Endlagerfindungskommission [1]

#### 3.3 Tiefenlagerung in tonhaltigen Gesteinen

Bei dieser möglichen Endlagervariante müssen einige grundsätzliche Überlegungen angestellt werden, die zu Fragestellungen führen, die bisher kaum erforscht sind und deren kritischen Einflüsse dadurch noch nicht abschließend bewertet werden können.

Da tonhaltige Gesteine nicht über die Stabilität von Salzstöcken verfügen, müssten hier Untertagebauwerke aus Beton errichtet werden. Dies käme dem Vorhaben eines „tiefen Tunnelbaus“ gleich. Dabei wird es naturgemäß Kontaktzonen zwischen Beton und Gestein geben, wobei die Langzeit-Wechselwirkung beider Materialien bisher wenig untersucht wurde und damit schwer einzuschätzen ist.

Das positive Verhalten der tonhaltigen Gesteine, das sich in deren Selbstheilungspotential durch Quellvorgänge zeigt, kann durch den hohen pH-Wert des angrenzenden Betons ( $>12$ ) abgeschwächt werden [2]. Es findet damit eine Auslaugung in den Grenzbereichen statt. Man müsste also den pH-Wert des Betons durch gezielte Maßnahmen verringern,

was den Einsatz spezieller Zemente erforderlich machen würde. Damit einhergehen würde die Reduktion des Korrosionsschutzes einer etwaigen Stahlbewehrung. Dem könnte man nur entweder durch ein aufwändiges Bauwerksdesign (überwiegend nur druckbelastete Bauteile) oder wiederum durch alternative Bewehrungslösungen entgegenwirken.

#### 3.4 Oberirdische Endlager

Neue Konzeptionen für Endlager sollten auch die Variante eines Verzichts auf die Tiefenlagerung in Erwägung ziehen. Hierzu sollen im Folgenden einige Denkansätze skizziert werden, die unter Verwendung modernster Betontechnologie und Betonbautechnik realisierbar wären.

Mit Hilfe geeigneter Lastannahmen, aktuellem Planungswissen und der Verwendung modernster Materialien können sowohl geologischen Tiefenlager als auch oberirdische Lagerstätten sicher vor menschlichen kriegerischen und terroristischen Handlungen sowie vor Flugzeugabstürzen ausgelegt werden.

Die positiven Aspekte einer solchen oberirdischen Lösung sind offensichtlich:

- Eine einfache und kostengünstige Erstellung ist an beliebigen Orten möglich (unter Berücksichtigung des gesellschaftlichen und politischen Widerstands)
- Die Forderung der Rückholbarkeit ist leicht zu erfüllen
- Neue Zwischenlager könnten zu Endlagern ausgebaut werden

Sollten Zweifel an der Sicherheit einer oberirdischen Lösung bestehen, muss sich die Gesellschaft fragen, ob man dann jemals kerntechnische Anlagen und Zwischenlager an der Oberfläche hätte bauen dürfen. Wenn man bestehende Anlagen als sicher einschätzt, warum sollte dann eine Endlagerung nicht auch oberirdisch erfolgen können?

Als Beispiel für die Ausbaubarkeit eines nach dem oben vorgestellten Konzept errichteten Zwischenlagers zeigt Abb. 5 die Erweiterung der modularen Zwischenlagerstruktur durch zusätzliche Geschosse, die auch die Aufnahme schwach aktiver Abfälle ermöglichen. Nach der Bestückung der Zusatzflächen mit den Behältern für die schwach aktiven Abfälle wird in

ähnlicher Form wie bei den Einzelmodulen eine zusätzliche massive Einhausung aus UHPC-Fertigteilen ergänzt, die für einen sicheren Einschluss sorgt. Hierbei müssen wiederum entsprechende Technologien für die Fugen- und Verbindungsausbildungen eingesetzt werden, da ggf. die sehr massiven Bauteile aus Teilelementen bestehen müssen (siehe Abb. 6).

Im letzten Arbeitsschritt kann auch hier eine künstliche Erdüberdeckung aufgeschüttet werden, die es trotz ihrer Schutzwirkung leicht ermöglicht, die Abfälle zurückzuholen, sofern neue Technologien zur weiteren Behandlung der radioaktiven Restmaterialien zur Verfügung stehen (siehe Abb. 7).

Denkbar wäre auch, das Endlager in einer offenen Baugrube, zum Beispiel 50-100 m tief, anzulegen und nach seiner Fertigstellung einen oberirdischen Geländeausgleich vorzunehmen. Für alle Zwischen- und Endlager gilt, dass ein geeignetes System des Monitorings sowie der Überwachung und Kontrolle entwickelt werden muss.

Die Umsetzung des aufgezeigten Endlagerkonzepts fordert natürlich gezielte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um den heutigen Kenntnisstand zu neuen Materialien und Verbundsystemen zu erweitern bzw. weiter abzusichern und gänzlich neue robuste Konzepte zu entwickeln.



Abb. 5: Erweiterung des Zwischenlagers für schwachaktive Abfälle hinsichtlich des Ausbaus zum Endlager

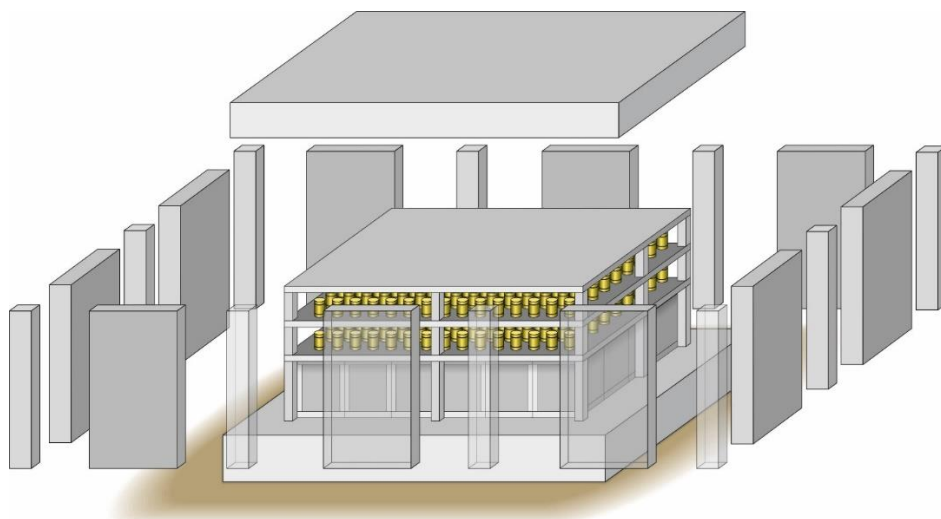


Abb. 6: Zusätzliches Einschlussbauwerk für das Endlager unter Verwendung von Fertigteilen



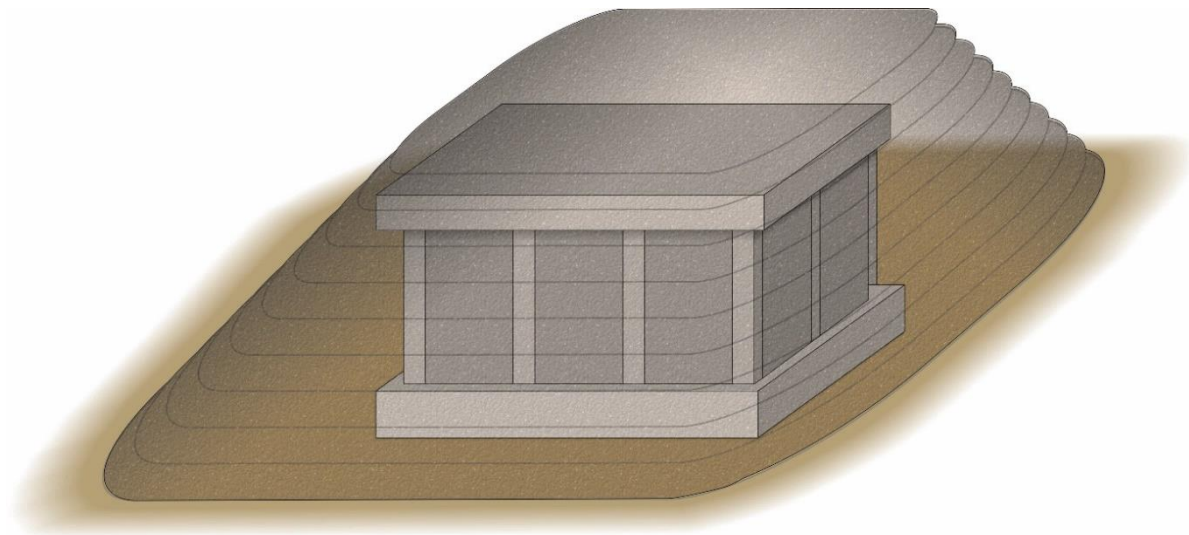


Abb. 7: Oberflächennahe Einbettung des geschlossenen Endlagers ins Erdreich

#### 4 Zusammenfassung

Eine zentrale Forderung des neuen Endlagerkonzeptes des Abschlussberichtes der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe „Verantwortung für die Zukunft – ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes“ ist die Rückholbarkeit der nuklearen Abfälle aus dem Endlager, um späteren Generationen das weitere Vorgehen bzw. eine Risikominimierung mit Hilfe neuer Technologien zu ermöglichen.

Um diese Forderung zu erfüllen, böte sich die Erstellung von Zwischen- und Endlagerstrukturen in Fertigteilbauweise als gute Lösung an. Nach der Festlegung der zu berücksichtigenden Einwirkungen entsprechend neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen könnten die bemessungsrelevanten Kennwerte ermittelt und die entsprechenden Nachweisformate hergeleitet werden. Weitere Fragestellungen betreffen insbesondere die Optimierung der Verbindungstechnik des Fertigteilsystems sowie die Planung und die baubetriebliche Realisierung dieses erweiterten Endlagerkonzeptes.

Im Bereich der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle ergibt sich ebenfalls eine Motivation für neue Herangehensweisen. Grund hierfür ist die Tatsache, dass bereits in den 2030er-Jahren die ersten Genehmigungen für bestehende Zwischenlager auslaufen werden und damit die Errichtung neuer Zwischenlager, möglicherweise an den zu diesem Zeitpunkt noch nicht nutzbaren Endlagerstandorten, erforderlich sein könnte.

Diese neuen Zwischenlager werden mit großer Sicherheit oberirdisch oder zumindest oberflächennah, das heißt nur wenig tief im Erdreich, angeordnet sein. Sie müssen alle Anforderungen des Umgebungs-

schutzes insbesondere auch bei Anpralllasten (Flugzeugabsturz), terroristischen Anschlägen und Naturkatastrophen erfüllen. Hierfür kommen nur extrem widerstandsfähige Strukturen z. B. aus hochduktilen UHPC in Frage. Dieser neue, aber inzwischen hinreichend gut erforschte Baustoff erfüllt hinsichtlich Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit die für solche Konstruktionen unabdingbaren Anforderungen.

Die so erstellten Zwischenlager könnten bei einem Verzicht auf die unterirdische Endlagerung zu dauerhaften Lagerstätten ausgebaut werden, die den Anforderungen sowohl an die Sicherheit als auch an die Rückholbarkeit genügen würden. Einige baubetriebliche Fragestellungen zu diesen speziellen Strukturen müssten noch geklärt werden, um in jedem Bauzustand die erforderliche Sicherheit zu gewährleisten.

Für jede Art der Zwischen- oder Endlagerung gilt, dass geeignete Monitoring sowie Kontroll- und Überwachungssysteme entwickelt werden müssen.

#### 5 Literatur

- [1] Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe „Verantwortung für die Zukunft – ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes“; K-Drs. 268; Juli 2016
- [2] Bradbury, M.H.; Bayens, B.: Project Opalinus Clay: Sorption Data Bases for Opalinus Clay Influenced by a High pH Plume; National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Technical Report 03-12, Paul Scherrer Institut; Villigen PSI; Switzerland, November 2004

## **Autoren**

### **Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller**

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 3  
76131 Karlsruhe

### **Dr.-Ing. Nico Herrmann**

Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Str. 3  
76131 Karlsruhe